

Article, Published Version

Ratz, Kerstin; Odenwald, Bernhard

Dränagen zur Erhöhung der Standsicherheit von Bauwerken in Kanaldämmen

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102575>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ratz, Kerstin; Odenwald, Bernhard (2011): Dränagen zur Erhöhung der Standsicherheit von Bauwerken in Kanaldämmen. In: BAWMitteilungen 94. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 77-88.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dränagen zur Erhöhung der Standsicherheit von Bauwerken in Kanaldämmen

Drainage Measures to Increase the Stability of Structures in Embankment Canal Dams

Dipl.-Ing. Kerstin Ratz, Dr.-Ing. Bernhard Odenwald, Bundesanstalt für Wasserbau

In Dammstrecken von Kanälen, die zumeist mit einer Dichtung des Gewässerbetts versehen sind, existiert eine Vielzahl von Unterquerungsbauwerken und Kanalbrücken. Dabei ist nach Merkblatt Standsicherheit von Dämmen in Bundeswasserstraßen (MSD) die Standsicherheit sowohl der Dämme als auch der darin befindlichen Bauwerke unter Berücksichtigung eines hydraulischen Versagens der Kanaldichtung in der außergewöhnlichen Bemessungssituation nachzuweisen. Durch Anordnung von Dränagen kann die aus dem hydraulischen Versagen der Kanaldichtung resultierende Wasserdruckbelastung auf das Bauwerk deutlich reduziert und damit eine ausreichende Standsicherheit auch für diese Beanspruchungen erzielt werden. Auf Grundlage eines vereinfachten Modells eines Kanalbrückenwiderlagers werden die Auswirkungen von Dränagen auf die Standsicherheit des Bauwerks dargestellt. Dabei wurden zwei Dränagesysteme, die beim Bau im Zuge der Hinterfüllung des Bauwerks eingebaut werden können (Flächendrönage und Rigole), und zwei Dränagesysteme, die sich zu einem nachträglichen Einbau durch das Bauwerk eignen (Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen) untersucht. Basierend auf diesen Untersuchungen werden die Dränagesysteme hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilt und es werden Hinweise zur Anordnung und Ausführung der Dränagen sowie zu der für die Dimensionierung der Dränagen erforderlichen numerischen Grundwasserströmungsberechnung gegeben.

Embankment dam stretches of canals with an impervious lining of the canal bed often comprise numerous underpass structures and bridges. The Code of Practice "Safety of Embankment dams at German Inland Waterways" requires the verification of embankment dam stability as well as of the stability of embedded structures considering a hydraulic failure of the canal lining

in the accidental design situation. Installing drains can reduce the water load resulting from hydraulic failure of the canal lining and thus can ensure sufficient stability even under these loadings. Based on a simplified model of a canal bridge abutment, the impact of drainage on the stability of the structure is illustrated. For this purpose, two drainage systems which can be installed during the backfilling of the structures (drainage layer, horizontal drain behind the structure), and two drainage systems which are suitable for the installation after the completion of the structure (horizontal drains through the structure, relief openings in the structure) were analysed. Based on this analysis, the drainage systems are assessed in terms of their efficiency. Advice is given on the positioning and implementing of the drains as well as on the numerical computation of groundwater seepage flow which is necessary for the dimensioning of the drains.

1 Einleitung *Introduction*

Ein großer Teil der insgesamt ca. 1.700 km langen Kanalstrecken der bundesdeutschen Binnenwasserstraßen befindet sich in sogenannter Dammlage, wobei der Wasserstand im Kanal teilweise deutlich über der Oberfläche des angrenzenden Geländes liegt. In diesen, i. d. R. mit einer Dichtung des Kanalbetts versehenen Dammstrecken existiert eine Vielzahl von Unterführungsbauwerken und Kanalbrücken, bei denen ein Fließgewässer oder ein Verkehrsweg unter einem Schiffahrtskanal hindurchgeführt wird. In Bild 1 und Bild 2 sind beispielhaft das Einlaufbauwerk eines Dükers unter dem Mittellandkanal und eine Kanalbrücke über ein Gewässer unter dem Elbe-Seitenkanal dargestellt. Für diese gedichteten Kanalstrecken ist

in der außergewöhnlichen Bemessungssituation nach „Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)“ [1], die Standsicherheit der Kanaldämme und der darin befindlichen Bauwerke unter Berücksichtigung der Auswirkungen eines hydraulischen Versagens der Kanaldichtung nachzuweisen.



Bild 1: Einlaufbauwerk eines Dükers unter dem Mittel-landkanal

Figure 1: Inlet structure of a culvert below the Midland Canal



Bild 2: Kanalbrücke des Elbe-Seitenkanals

Figure 2: Canal bridge of the Elbe Lateral Canal

Unterführungsbauwerke beinhalten zumeist Kopfbauwerke mit seitlich anschließenden Flügelwänden zur Stützung der im Ein- und Auslaufbereich angeschnittenen Dammböschungen. Kanalbrücken ruhen auf massiven Betonwiderlagern, an die sich seitlich ebenfalls oft Flügelwände zur Stützung der Kanaldämme anschließen. Bei Annahme eines hydraulischen Ausfalls der Kanaldichtung gemäß MSD ergibt sich eine erhebliche Wasserdruckbelastung auf die Kopfbauwerke von Kanalunterführungen und die Widerlager von Kanalbrücken sowie die daran anschließenden Stützwände. Da unter Berücksichtigung dieser Wasserdruckbelas-

tungen die Sicherheit der Bauwerksteile gegen Gleiten, Kippen und Grundbruch oft nicht nachgewiesen werden kann, sind häufig Zusatzmaßnahmen erforderlich.

Dränagesysteme können hier eine wirtschaftliche und technisch effektive Maßnahme zur Gewährleistung der Standsicherheit der Bauwerksteile darstellen. Auch bei bestehenden Bauwerken, für die eine ausreichende Standsicherheit bei Berücksichtigung der Wasserdruckbelastung infolge eines hydraulischen Versagens der Kanaldichtung nicht nachgewiesen werden kann, ist eine Sicherung durch nachträglich durch die Bauwerksteile bis in den dahinter anstehenden Baugrund eingebrachte Dränagesysteme möglich. Im Gegensatz zu konstruktiven Maßnahmen, wie z. B. Verankerungen, werden Dränagen nur wirksam, wenn eine erhöhte Belastung infolge eines Grundwasseranstiegs durch einen Zufluss aus dem Kanal bei Leckagen in der Kanaldichtung auftritt. Die ausreichende Standsicherheit der Bauwerksteile wird in diesem Fall durch die Reduzierung der Grundwasserdruckbelastung sicher gestellt. Zudem dienen Dränagesysteme als Kontrollinstrument zum Erkennen einer Beschädigung der Kanaldichtung und der daraus resultierenden Zuströmung aus dem Kanal.

Gemäß der neuen Fassung des „Merkblatts Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)“, Ausgabe 2011 [1], darf die den Wasserdruck vermindernde Wirkung einer Dränage nur angesetzt werden, wenn

- die geometrische Filterstabilität des Dränmaterials gegenüber dem Baugrund nachgewiesen wird bzw. ist und
- bei Dräns, bei denen zur Ableitung des gefassten Wassers eine Dränleitung erforderlich ist, eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Dränageleitung möglich ist und regelmäßig durchgeführt wird.

Sind diese Kriterien erfüllt, so ist davon auszugehen, dass die Funktionsfähigkeit der Dränage dauerhaft gegeben ist. In diesem Fall ist die Berücksichtigung der Auswirkungen eines gleichzeitigen hydraulischen Versagens der Kanaldichtung und der Dränage in der außergewöhnlichen Bemessungssituation nicht erforderlich.

2 Untersuchte Dränagesysteme *Analysed drainage systems*

Für das Beispiel eines Kanalbrückenwiderlagers wurden die vier in Bild 3 qualitativ dargestellten Dränagesysteme untersucht.

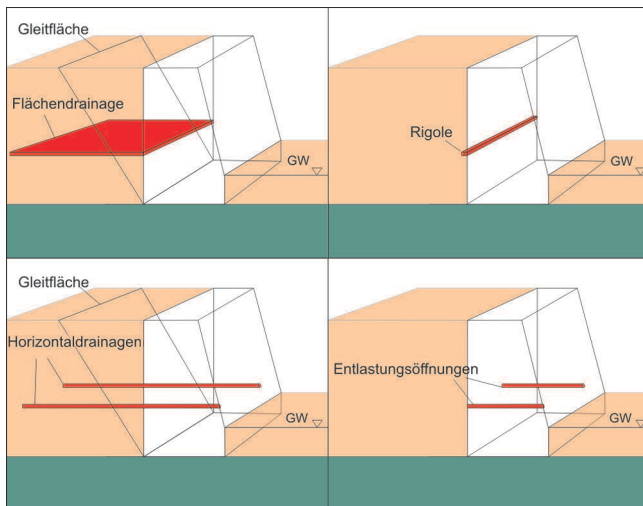


Bild 3: Untersuchte Dränagesysteme
Figure 3: Analysed drainage systems

Das erste Dränagesystem besteht aus einer über die gesamte Breite des Widerlagers reichenden horizontalen Flächendrainage. Diese Dränageschicht wird bei der Hinterfüllung des Kanalbrückenwiderlagers mit einem gegenüber dem Verfüllboden filterstabilen Aufbau eingebaut. Sie besteht aus einem möglichst einkörnigen Drainagekies mit einem beidseitig angeordneten geotextilen oder Mineralkornfilter. Die Fassung des Wassers erfolgt über eine oder mehrere in der Kies-schicht parallel zum Widerlager verlegten Drainageleitungen. An diese Drainageleitungen sind Ableitungen angeschlossen, über die das gefasste Wasser durch den seitlichen Kanaldamm abgeführt wird. Zur Kontrolle und Reinigung der Drainage- und Ableitungen sind Kontrollschächte im Kanaldamm und eine geradlinige Anordnung der Leitungen mit ausreichendem Rohrdurchmesser erforderlich. Um die Dauerhaftigkeit der Drainage sicherzustellen, müssen die Leitungen eine ausreichende Widerstandsfähigkeit und Stabilität in Abhängigkeit von ihrer Belastung aufweisen. Die Drainageleitungen sollten eine möglichst große, jedoch an die Drainagekieskörnung angepasste Schlitz- bzw. Lochweite aufweisen. Die Dränageschicht sollte möglichst tief, jedoch oberhalb des durch Zuflüsse aus dem Kanal unbeeinflussten Grundwasserspiegels angeordnet werden. Außerdem sollte der Abfluss in den

Dränage- und Ableitungen im Freispiegelgefälle ohne Rückstau und ohne Pumpeneinsatz erfolgen. Um horizontale, auf das Widerlager wirkende Strömungskräfte weitgehend zu vermeiden sollte die Flächendrainage bis hinter den aktiven Gleitkeil reichen.

Das zweite untersuchte Dränagesystem besteht aus einer kiesummantelten Drainageleitung (Rigole), die ebenfalls über die gesamte Breite des Widerlagers reicht. Die Rigole entspricht einer Flächendrainage mit geringer Ausdehnung in die Tiefe. Wie bei der Flächendrainage wird die Rigole bei der Hinterfüllung des Widerlagers mit seitlicher Ableitung des gefassten Wassers durch den Kanaldamm erstellt.

Der nachträgliche Einbau einer Flächendrainage oder einer Rigole hinter einem Bauwerk auf Grund eines festgestellten Standsicherheitsdefizits ist zumeist nicht oder nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand möglich. Zur Sicherung der Bauwerke bieten sich hier Dränagen oder Entlastungsöffnungen an, die durch das Bauwerk bis in den dahinter anstehenden Baugrund erstellt werden.

Das dritte Dränagesystem besteht aus Horizontaldränagen, die parallel zueinander in regelmäßigem Abstand durch das Bauwerk in den dahinter anstehenden Baugrund eingebracht werden. Die Horizontaldränagen bestehen i. d. R. aus geschlitzten Kunststoffrohren, die in Abhängigkeit vom anstehenden Baugrund mit einem Filter (z. B. Kiesklebfilter oder Wickeldrahtfilter) ummantelt sind. Der Einbau der Horizontaldränagen erfolgt über senkrecht zur Wand angeordnete Horizontalbohrungen. Durch die Bohrungen in der Wand wird ein freier (druckloser) Ablauf des in den Dränagen gesammelten Wassers ermöglicht. Die Abstände der Dränagen zueinander und die Einbauhöhe der Dränagen sind abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und der erforderlichen Absenktiefe. Wie eine Flächendrainage sollten sie möglichst tief, jedoch oberhalb des durch Zuflüsse aus dem Kanal unbeeinflussten Grundwasserspiegels angeordnet werden.

Bei dem vierten Dränagesystem handelt es sich um Drainageöffnungen, die nur durch das Bauwerk, aber im Unterschied zu den Horizontaldränagen nicht bis in den dahinter anstehenden Baugrund reichen. Sie werden ebenfalls durch senkrecht zur Wandoberfläche angeordnete Horizontalbohrungen hergestellt. Auch in die Drainageöffnungen ist ein geeigneter Filter einzu-

bauen, der einen Austrag von Bodenmaterial bei freiem Wasserabfluss verhindert.

3 Berechnungsgrundlagen

Basics of computation

Nachstehend sind das verwendete Berechnungsmodell für das Kanalbrückenwiderlager sowie die auf das Widerlager einwirkenden Kräfte bei unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen dargestellt.

3.1 Berechnungsmodell

Computation model

Zur Ermittlung der Auswirkungen der unterschiedlichen Dränagesysteme auf die Druckverteilung hinter einem Bauwerk bei Zuströmung aus dem Kanal wurde das im unteren Teil von Bild 4 dargestellte und nachstehend beschriebene Berechnungsmodell verwendet. Es handelt sich um ein vereinfachtes, vertikal-ebenes Modell eines Widerlagers einer Kanalbrücke, wie im oberen Teil von Bild 4 beispielhaft dargestellt.

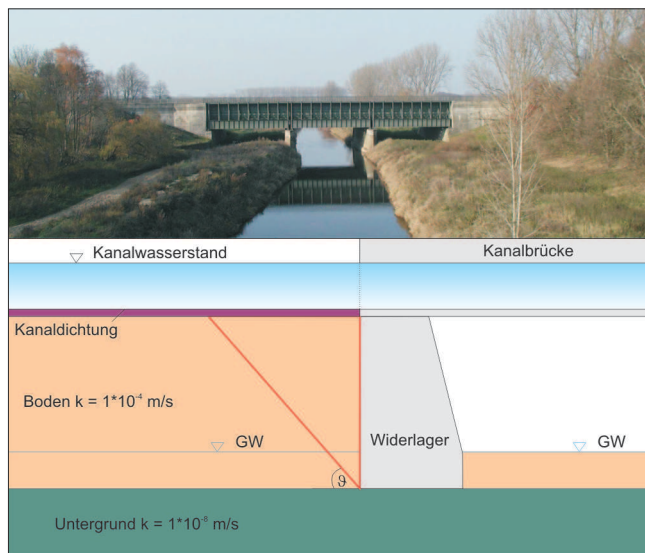


Bild 4: Berechnungsmodell
Figure 4: *Computation model*

Es wird angenommen, dass es sich um eine gedichtete Kanalstrecke handelt, die in eine Kanalbrücke übergeht. Das massive Betonwiderlager, auf dem die Kanalbrücke ruht, steht auf einem gering durchlässigen Untergrund. Vor und hinter dem Widerlager steht das gleiche Bodenmaterial an. Bei intakter Kanaldichtung sind Kanalwasserspiegel und Grundwasser getrennt,

wobei der Grundwasserstand vor dem Widerlager auf Höhe der Geländeoberfläche und auf gleicher Höhe hinter dem Widerlager angenommen wird.

Die Auswirkungen der modellierten Dränagen auf die Standsicherheit des Widerlagers werden beispielhaft am Nachweis gegen Gleiten dargestellt. Zur Berechnung der Grundwasserströmung wurde das Finite Elemente Programmsystem FEFLOW der DHI-WASY GmbH verwendet. Unter Annahme eines vollständigen hydraulischen Versagens der Kanaldichtung wurde die Wasserdruck- und Strömungsbelastung auf die Widerlagerwand ermittelt.

Das Modellgebiet wird durch ein Finite-Elemente-Netz diskretisiert (Bild 5). Bereiche, in denen starke Änderungen des hydraulischen Gradienten auftreten können, werden feiner diskretisiert. An den Rändern des Modells werden die Grundwasserverhältnisse durch Randbedingungen festgelegt. Der linke, der rechte und der untere Modellrand werden als Randstromlinien definiert (rote Linie). Das Widerlager wird als undurchlässig angenommen und deshalb aus dem Modellbereich ausgeschnitten (ebenfalls Randstromlinien). An der Kanalsohle und auf der Luftseite des Widerlagers werden jeweils konstante Grundwasserpotenziale (Kanalwasserstand bzw. Höhe der Geländeoberfläche) als Dirichlet-Randbedingung (blaue Linie) vorgegeben. Im Bereich des Drainageauslasses (mögliche Wasser- austritte) wird ein Grundwasserpotenzial entsprechend der Ortshöhe ebenfalls als Dirichlet-Randbedingung mit der Nebenbedingung, dass hier nur Abflüsse und keine Zuflüsse erfolgen können, angesetzt (grüne Linie).

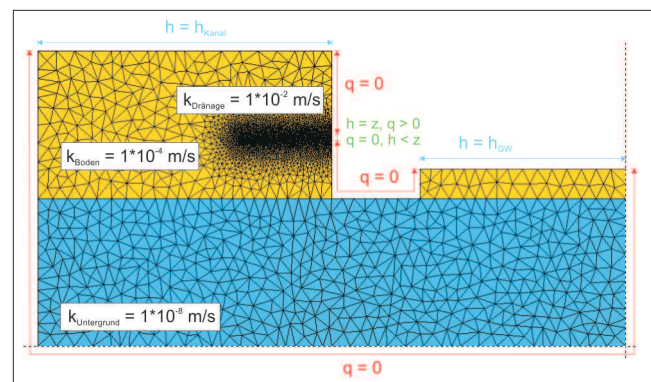


Bild 5: Grundwassermodell mit Randbedingungen
Figure 5: *Groundwater model with boundary conditions*

3.2 Einwirkende Kräfte

Acting forces

Für den Nachweis gegen Gleiten werden die auf das Widerlager einwirkenden treibenden und haltenden Kräfte gegenübergestellt. Der Nachweis erfolgt daher über die vereinfachte Formel

$$E_p + W_4 + (G - W_3) \cdot \tan \delta_s \geq E_a + W_2 \quad (1)$$

In Bild 6 sind die auf das Widerlager bei intakter Kanaldichtung einwirkenden Kräfte dargestellt. Auf das Widerlager wirken bei intakter Kanaldichtung vor und hinter diesem die gleichen Wasserdrücke W_2 und W_4 . Entgegen dem Gewicht G aus dem Eigengewicht des Widerlagers und der Auflast aus der Brücke wirkt der Sohlwasserdruck W_3 auf die Sohle des Widerlagers. Der Erddruck auf der aktiven Seite E_a und der Erdwiderstand (passive Erddruck) E_p werden vereinfacht als horizontal wirkende Kräfte angenommen.

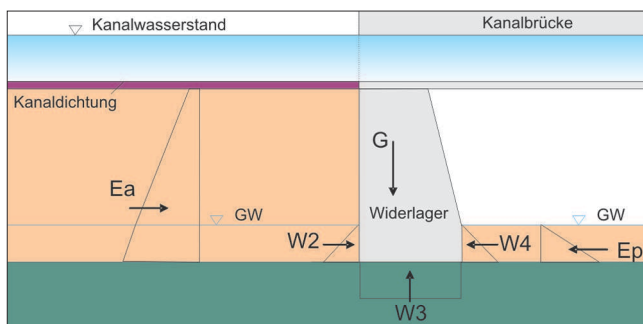


Bild 6: Kräfte auf das Widerlager (intakte Kanaldichtung)
Figure 6: Forces acting on the abutment (canal lining intact)

Bei Ausfall der Kanaldichtung erhöhen sich infolge des zuströmenden Wassers die Wasserdrücke W_2 und W_3 (Bild 7). Auf Grund des gering durchlässigen Untergrundes und der daraus resultierenden vernachlässigbaren Unterströmung des Widerlagers ergibt sich ein hydrostatischer Wasserdruck W_2 bis auf Höhe Kanalwasserspiegel. Der aktive Erddruck E_a wird infolge der durch den Auftrieb verminderten Wichte des Bodens etwas kleiner. Die luftseitig wirkenden Kräfte E_p und W_4 bleiben durch die Annahme des gering durchlässigen Untergrunds unbeeinflusst.

Nach der Coulomb'schen Erddrucktheorie ergibt sich der Erddruck auf eine Wand aus einem Gleitkeil hinter der Wand unter dem Winkel ϑ (Bild 8), wobei alle Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sein müssen. Nach DIN 4085:2007 [2] darf der aktive Erddruck unter der Annahme einer ebenen Gleitfläche ermittelt werden.

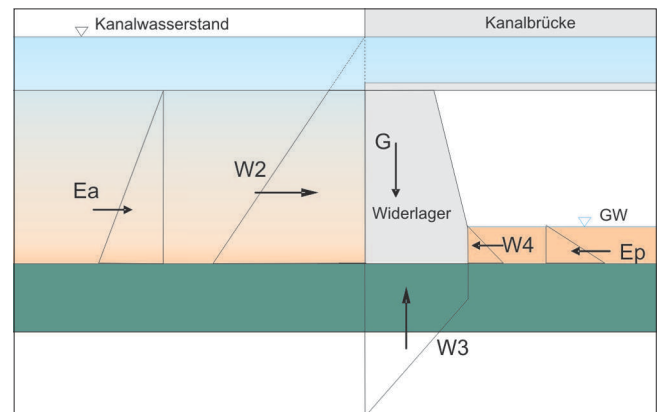


Bild 7: Kräfte auf das Widerlager (defekte Kanaldichtung)
Figure 7: Forces acting on the abutment (canal lining defective)

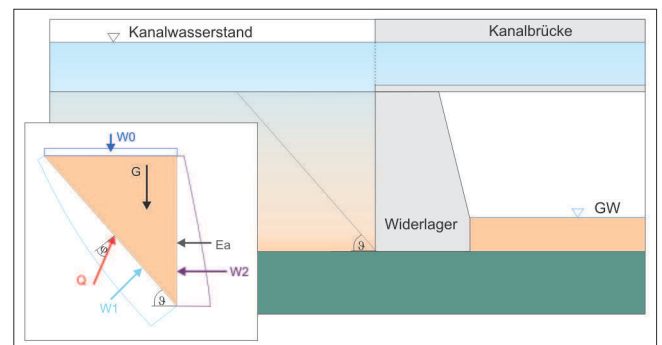


Bild 8: Kräfte am Gleitkeil
Figure 8: Forces acting on the sliding wedge

Bei hydrostatischen Grundwasserdruckverhältnissen ist eine einfache Ermittlung des Erddrucks mittels Tabellenwerten möglich. Wird ein Bauwerk um- bzw. angeströmt, übt das Grundwasser einen Strömungsdruck auf die Bodenmasse des für aktiven Erddruck maßgebenden Gleitkörpers aus und verändert damit die Größe des Erddrucks. Die auf den Gleitkörper wirkenden, äußeren Wasserdruckkräfte können unmittelbar aus der numerischen Grundwasserströmungsberechnung entnommen werden. Damit sind alle auf den Gleitkörper wirkenden Kräfte (Bild 8) außer der Bodenresultierenden Q und dem auf das Widerlager wirkenden, aktiven Erddruck E_a bekannt. Da zusätzlich die Wirkungsrichtung dieser beiden letztgenannten Kräfte als bekannt vorausgesetzt wird, kann die Ermittlung der Erddruckkraft E_a mit Hilfe eines Kraftecks (Bild 9) erfolgen. Die Strömungskraft ergibt sich dabei aus der Differenz der äußeren Wasserdruckkräfte unter Berücksichtigung der Gewichtskraft des Wassers G_w im Gleitkeil.

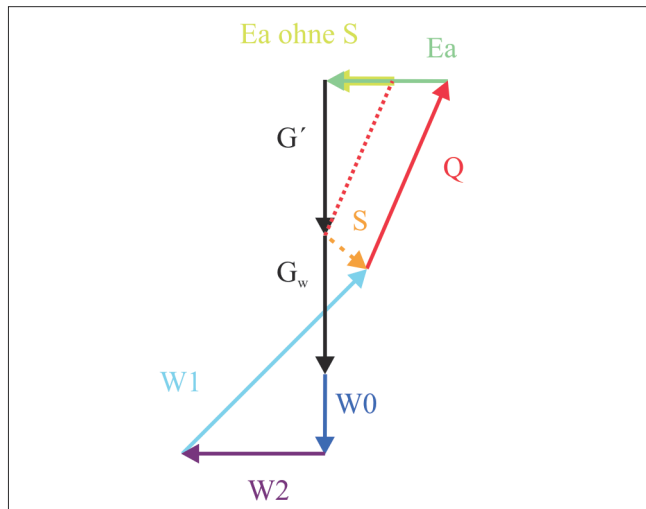


Bild 9: Kräfteckung, Auswirkung der Strömungskraft S auf den aktiven Erddruck E_a

Figure 9: Polygon of forces; impact of flow force S on active earth pressures E_a

Bild 9 verdeutlicht, wie groß der Einfluss des Strömungsdrucks auf den Erddruck ist. Bei einer Strömung in Richtung Widerlager ist der mittels Tabellenwerten, nur unter Berücksichtigung des Auftriebs aber ohne Berücksichtigung der Strömungskraft, ermittelte aktive Erddruck deutlich geringer als der aus dem Kräfteck unter zusätzlicher Berücksichtigung der Strömungskraft ermittelte aktive Erddruck. Die Vernachlässigung der Strömungskraft führt somit bei einer Anströmung des Widerlagers zu einer deutlichen Unterschätzung der auf das Widerlager wirkenden aktiven Erddruckkraft.

In den folgenden Berechnungen wurde die Wirkung der oben beschriebenen Dränagesysteme bei Annahme eines vollständigen hydraulischen Versagens der Kanaldichtung untersucht. Für die Gegenüberstellung der auf das Widerlager wirkenden Kräfte wurde der Erddruck unter Berücksichtigung der Strömungskraft mit Hilfe eines Kräftecks ermittelt.

4 Berechnungsergebnisse

Computation results

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse für die unterschiedlichen Dränagearten dargestellt und miteinander verglichen. Darauf basierend wird die Effizienz der Dränagen zur Erhöhung der Standsicherheit von Bauwerken in Dämmen bei hydraulischem Versagen der Kanaldichtung bewertet.

4.1 Flächendränge und Rigole hinter dem Widerlager

Drainage layer and horizontal drain behind the abutment

Sowohl für die Flächendränge als auch die Rigole wird ein Einbau über die gesamte Breite des Widerlagers angenommen. Unter der weiteren Annahme eines vollständigen hydraulischen Versagens der Kanaldichtung erfolgt die Zuströmung zur Dränge gleichmäßig über die gesamte Breite des Widerlagers. Aus diesem Grund lässt sich die Grundwasserströmung in diesem Fall durch ein zweidimensionales, vertikal-ebenes numerisches Modell, wie in Bild 5 dargestellt, abbilden.

In Bild 10 ist die Grundwasserpotenzialverteilung unter Annahme eines vollständigen hydraulischen Versagens der Kanaldichtung ohne und mit Berücksichtigung von Dränagen dargestellt. Ohne den Einbau einer Dränge findet der gesamte Potenzialabbau im gering durchlässigen Untergrund statt (Bild 10, oben).

Durch die Fassung und Ableitung des aus dem Kanal zuströmenden Wassers bewirkt der Einbau einer Dränge eine Reduzierung des Wasserdrucks auf das Widerlager. Auf Grund der Annahme eines freien, nicht rückgestauten Abflusses aus der Dränge stellt sich im Abflussbereich ein dem Luftdruck entsprechender Wasserdruck, bzw. ein Grundwasserpotenzial entsprechend der Ortshöhe des Abflussbereiches ein. Aus diesem Grund ergibt sich ein großer Anteil des Potenzialabbaus (bzw. Wasserdruckabbaus) im Zuflussbereich vom Kanal zur Dränge an der Rückseite des Widerlagers. Bei der Flächendränge erfolgt die Zuströmung zur Dränge innerhalb des Gleitkeils hauptsächlich vertikal nach unten gerichtet (Bild 10 Mitte). Im Gegensatz dazu stellt sich bei der Rigole auf Grund der geringen Ausdehnung in die Tiefe eine radiale Anströmung ein (Bild 10, unten). Dadurch ergibt sich innerhalb des Gleitkeils zusätzlich zur vertikal nach unten gerichteten Strömungskomponente eine horizontal zum Widerlager gerichtete Strömungskomponente. Diese horizontale Komponente der Strömungskraft geht bei Annahme einer ebenfalls horizontal wirkenden Erddruckkraft vollständig in diese ein. Die vertikal nach unten gerichtete Komponente der Strömungskraft bewirkt zwar ebenfalls eine Erhöhung des Erddrucks auf das Widerlager, jedoch nur zu einem wesentlich geringeren Anteil (siehe Bild 9). Um einen horizontalen Strömungsanteil innerhalb des Gleitkeils weitgehend zu vermeiden,

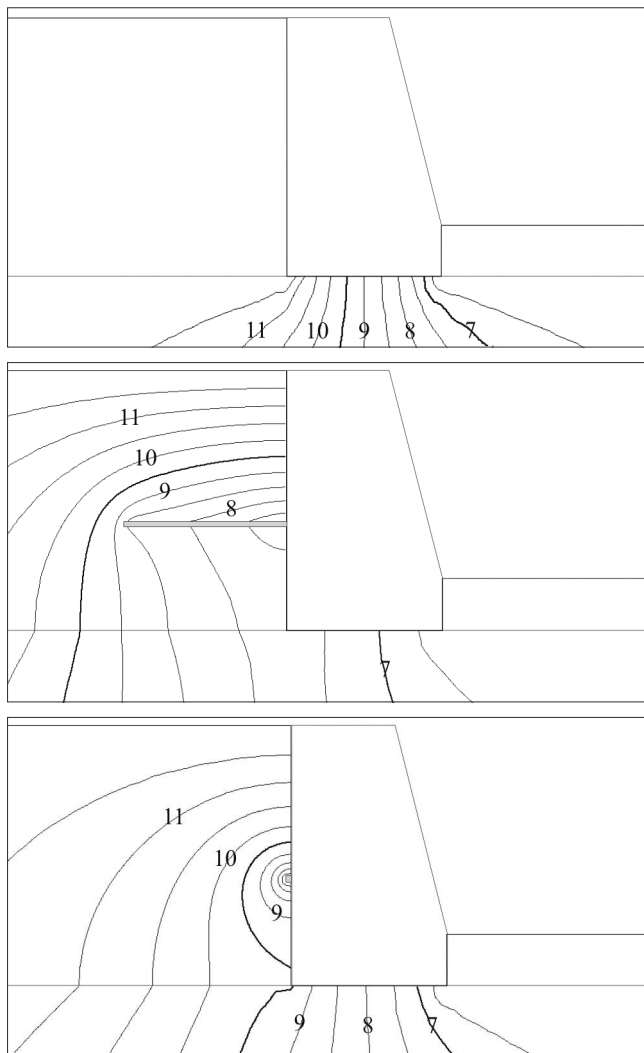


Bild 10: Grundwasserpotenzialverteilung bei Ausfall der Kanaldichtung (oben ohne Dränage, Mitte mit Flächendränage, unten mit Rigole)

Figure 10: Groundwater head distribution in case of failure of the canal lining (top: without drainage; middle: drainage layer; bottom: horizontal drain)

sollte deshalb eine Flächendränage immer bis hinter den Gleitkeil geführt werden.

Die Gegenüberstellung der bei Annahme eines vollständigen Versagens der Kanaldichtung auf das Widerlager wirkenden Kräfte in Tabelle 1 zeigt:

- Die Dränagen bewirken eine Erhöhung der haltenden Kräfte. Diese ergibt sich allein durch die vergrößerte Sohlreibung des Widerlagers auf Grund der Reduzierung des Sohlwasserdrucks W_3 . Die auf der Luftseite wirkenden Kräfte E_p und W_4 sowie die Gewichtskraft G bleiben unverändert.
- Die Dränagen bewirken in der Summe eine Verringerung der treibenden Kräfte. Durch die innerhalb des Gleitkeils wirkende Strömungskraft erhöht sich

	Ohne Dränage	Rigole	Flächendränage
Haltende Kräfte [kN/m]			
$E_p + W_4 + (G - W_3) \cdot \tan \delta_s$	147	166	180
Treibende Kräfte [kN/m]			
E_a	34	85	81
W_2	225	113	68
Summe	259	198	149
H/T	0,6	0,8	1,2

Tabelle 1: Haltende und treibende Kräfte bei hydraulischem Versagen der Kanaldichtung

Table 1: Holding and pushing forces in case of hydraulic failure of the canal lining

zwar der aktive Erddruck E_a . Diese Erhöhung des Erddrucks ist jedoch relativ gering im Vergleich zur Reduzierung des auf das Widerlager wirkenden Wasserdrucks W_2 .

- Die Flächendränage hat eine deutlich größere Wirkung auf die Erhöhung der haltenden Kräfte sowie insbesondere auf die Reduzierung der treibenden Kräfte und damit auf die Erhöhung der Sicherheit gegen Gleiten als die nur unmittelbar am Widerlager wirkende Rigole.

Der Quotient aus haltenden und treibenden Kräften H/T ergibt sich im Fall ohne Dränage zu 0,6, d. h. die haltenden Kräfte sind deutlich kleiner als die treibenden. Der Einbau einer Rigole führt zwar zu einer Verbesserung des Verhältnisses von haltenden zu treibenden Kräften. Jedoch sind auch hier bei einem Quotienten von 0,8 die haltenden Kräfte geringer als die treibenden. Erst beim Einbau einer Flächendränage ergibt sich ein Quotient $H/T > 1$. D. h. im vorliegenden Beispiel wird die Summe der haltenden Kräfte erst beim Einbau einer Flächendränage größer als die Summe der treibenden Kräfte.

4.2 Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen durch das Widerlager

Horizontal drains and relief openings through the abutment

Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen wirken im Gegensatz zu Flächendränagen und Rigolen nicht gleichmäßig über die gesamte Breite des Widerlagers. Vielmehr findet eine räumlich differenzierte Strömung mit der größten Absenkung des Grundwasserpotenzials unmittelbar an der Dränage oder der Entlastungsöffnung und der geringsten in der Mitte zwischen zwei

Dränagen oder Entlastungsöffnungen statt. Die Modellierung der Zuströmung zu Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen durch ein zweidimensionales, vertikal-ebenes Modell ist auf Grund der räumlichen Anströmung somit nicht möglich. Die Reduzierung des Grundwasserpotenzials durch Horizontaldränagen mit begrenzter seitlicher Ausdehnung wird bei Verwendung eines vertikal-ebenen Modells in Abhängigkeit vom Abstand der Dränagen teilweise deutlich überschätzt. Daher wurden die folgenden Berechnungen mit Hilfe eines dreidimensionalen Modells durchgeführt.

Für das hier verwendete, vereinfachte Berechnungsbeispiel ergibt sich bei in regelmäßigem Abstand parallel angeordneten Horizontaldränagen oder Entlastungsöffnungen eine jeweils symmetrische Anströmung der einzelnen Dränagen oder Öffnungen. Auf Grund der symmetrischen Strömungsverhältnisse ist es in diesem Fall ausreichend, in dem dreidimensionalen Modell einen Bereich mit einer dem halben Abstand zwischen den Dränagen entsprechenden Breite ausgehend von der Mitte einer Dränage abzubilden. Der im 3D-Modell abgebildete Modellbereich entspricht dem in Bild 11 grau markierten Abschnitt.

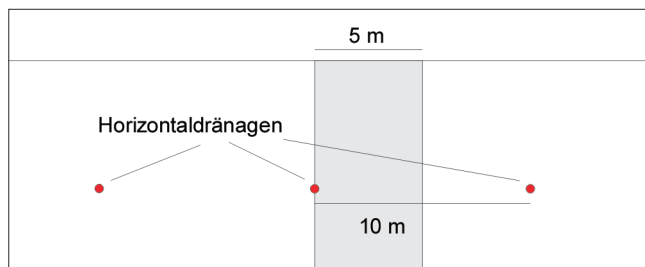


Bild 11: Abgrenzung des 3D-Modells
Figure 11: Limitations of the 3D model

Die Basisdiskretisierung des 3D-Modells bildet hier die durch die Achse der Horizontaldränage verlaufende vertikale x-z-Ebene. Durch die weiteren, parallel zu dieser Ebene in y-Richtung angeordneten Berechnungsebenen ergeben sich die Finiten Elemente des 3D-Modells zu Prismen mit Dreiecksgrundfläche. Um die Anströmung zur Dränage adäquat abbilden zu können ist es notwendig im Nahbereich der Dränage sehr geringe Ebenenabstände zu wählen. In Richtung zu dem in der Mitte bis zur benachbarten Dränage (Feldmitte) angeordneten Modellrand kann ein zunehmender Ebenenabstand gewählt werden. In Bild 12 ist die Diskretisierung des verwendeten 3D-Modells dargestellt,

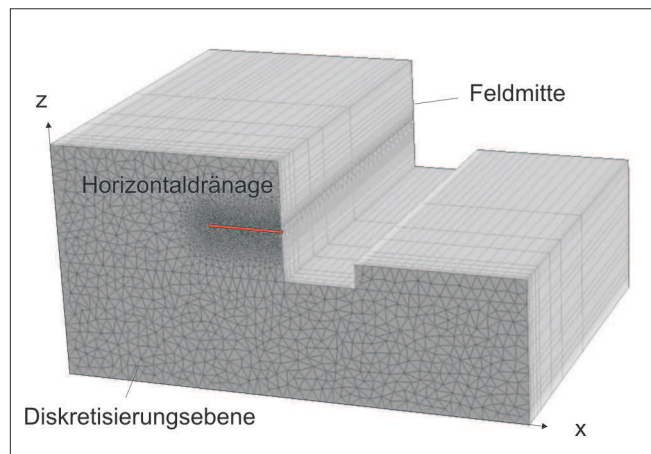


Bild 12: Diskretisierung des 3D-Grundwassermodells
Figure 12: Discretisation of the 3D model

wobei die Modellausdehnung in y-Richtung stark erhöht wurde um die Ebenenanordnung erkenntlich zu machen.

Im vorliegenden Beispiel wurden senkrecht zum Widerlager angeordnete Horizontaldränagen mit einer Länge von 10 m ab der Rückseite des Widerlagers und einem Durchmesser von 10 cm angenommen. Die Breite des Modells beträgt 5 m, was einem relativ großen Abstand der Dränagen von 10 m entspricht. Die Modellierung der Entlastungsöffnungen basierte auf dem gleichen Modell.

Bild 13 und Bild 14 geben die aus den 3D-Berechnungen unter Berücksichtigung der Horizontaldränagen und der Entlastungsöffnungen ermittelten Wasserdruckverteilungen wieder. Dargestellt sind der Wasserdruck auf die Widerlagerwand (durchgezogene Linie) und die Horizontalkomponente des Wasserdrucks auf die Gleitfläche (gestrichelte Linie) jeweils für die Ebene durch die Achse der Dränagen bzw. Entlastungsöffnungen sowie in der Symmetrieebene in der Mitte zwischen zwei Dränagen oder Entlastungsöffnungen (Feldmitte).

Bei Ansatz der 10 m langen Horizontaldränagen (Bild 13) ergibt sich in der durch die Dränage verlaufenden Ebene eine deutliche Wasserdruckreduzierung gegenüber der Berechnung ohne Dränage. Im Bereich der Dränage wird der Wasserdruck über deren gesamte Länge auf Null (Luftdruck) reduziert. Die Wirkung nimmt mit dem Abstand zur Dränage ab. In der Mitte zwischen zwei Dränagen (Feldmitte) ist der Wasserdruck am Größten. Jedoch auch bei dem hier gewählten großen Abstand von 10 m ergibt sich in Feldmitte noch ein geringerer Wasserdruck auf die Wand als ohne Dränage. Die ge-

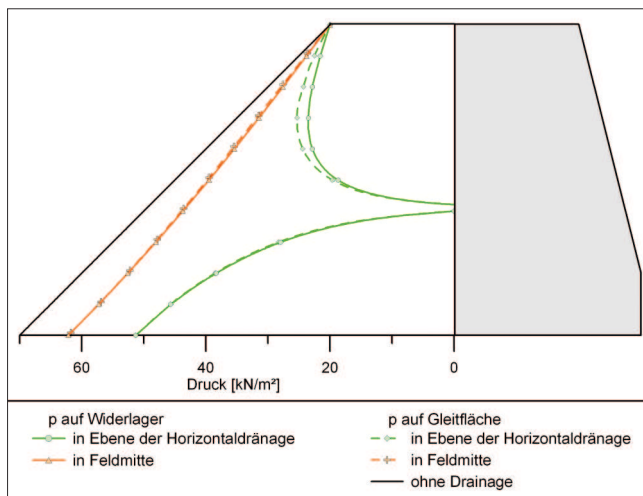


Bild 13: Wasserdruckverteilung auf das Widerlager mit Horizontaldränagen

Figure 13: Distribution of water pressure on the abutment with horizontal drains

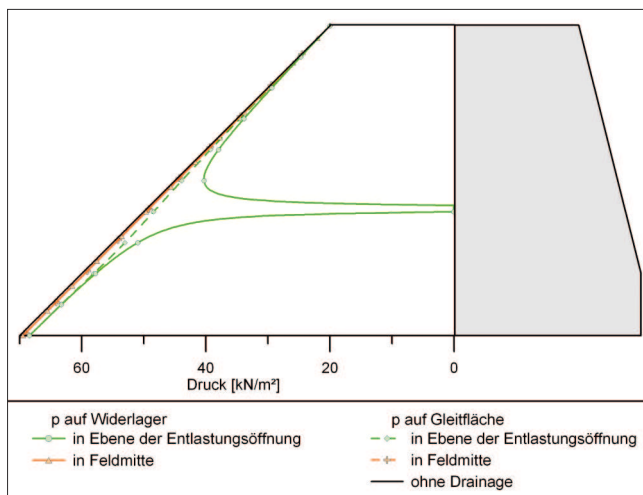


Bild 14: Wasserdruckverteilung auf das Widerlager mit Entlastungsöffnungen

Figure 14: Distribution of water pressure on the abutment with relief openings

ringe Differenz zwischen dem Wasserdruck auf die Wand und dem Wasserdruck auf die Gleitfläche (gestrichelte zu durchgezogene Linie) zeigt, dass der horizontale Anteil der Strömungskraft auf das Widerlager auf Grund der bis über die Gleitfläche hinausgehenden Dränagen gering ist.

Aus Bild 14 ist zu erkennen, dass der Einfluss von Entlastungsöffnungen auf die Wasserdruckverteilung nur sehr gering und lokal sehr begrenzt ist. Lediglich in der unmittelbaren Umgebung der Entlastungsöffnung ist eine Reduzierung des Wasserdrucks zu verzeichnen. Bereits in der durch die Entlastungsöffnung verlaufenden Ebene ergibt sich auf der Gleitfläche nur noch

eine minimale Reduzierung des Wasserdrucks. In der Symmetrieebene (Feldmitte) zwischen zwei Entlastungsöffnungen entspricht die Wasserdruckverteilung auf die Wand nahezu der Wasserdruckverteilung ohne Entlastungen.

4.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse für die untersuchten Dränagesysteme

Comparison of computation results for the analysed drainage systems

In Bild 15 und Bild 16 sind die Wasserdruckverteilungen bei Ansatz der Flächendränage und der Rigole zusammen mit den für Standsicherheitsnachweise ungünstigsten Belastungen in Feldmitte bei Ansatz von Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen dargestellt. Bild 15 zeigt die Wasserdrücke auf die Widerlagerwand und Bild 16 die Wasserdrücke auf die Gleitfläche.

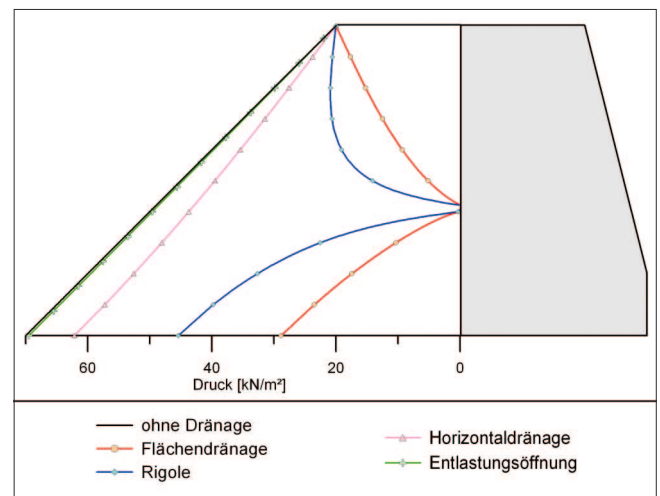


Bild 15: Wasserdruckverteilung auf die Widerlagerwand (in Feldmitte für Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen)

Figure 15: Distribution of water pressure on the abutment (in the middle between horizontal drains and relief openings)

Der Vergleich der vier untersuchten Dränagesysteme zeigt, dass die größte Reduzierung des Wasserdrucks mit der Flächendränage erreicht wird. Die geringste Wirkung wird durch die Entlastungsöffnungen erzielt.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den 2D und den 3D-Berechnungen zu erhalten, wurden alle ermittelten Wasserdrücke auf einen 5 m breiten Bereich bezogen. Dafür wurde die durch die unterschiedlichen Dränagesysteme erzielte Reduzierung des Wasser-

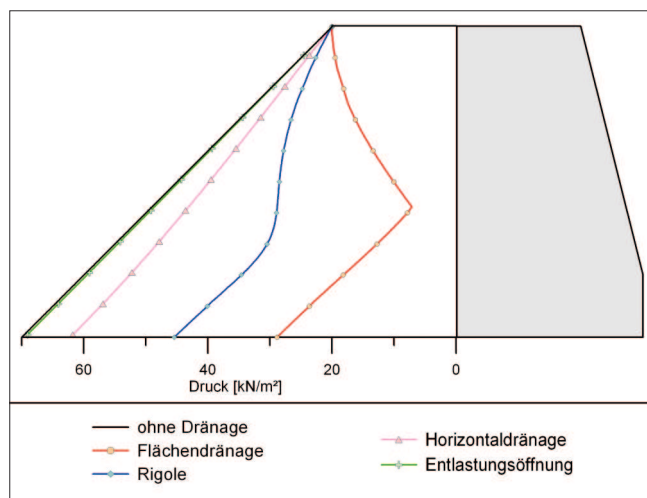


Bild 16: Wasserdruckverteilung auf die Gleitfläche (in Feldmitte für Horizontaldränagen und Entlastungsöffnungen)

Figure 16: Distribution of water pressure on the sliding face (in the middle between horizontal drains and relief openings)

drucks gegenüber dem Zustand ohne Dränage ermittelt. In Tabelle 2 ist dabei jeweils der maßgebende, horizontale Anteil des Wasserdrucks auf die aktive Gleitfläche angegeben. Zur Verdeutlichung der Auswirkung eines geringeren Dränageabstandes wurden zusätzlich Berechnungen für einen Dränageabstand von 5 m und 2 m durchgeführt. Die daraus ermittelten, auch auf eine Breite von 5 m bezogenen Wasserdrücke auf die Gleitfläche sind ebenfalls in Tabelle 2 angegeben.

Dränagesystem	Abstand [m]	$W_{1,h}$ [kN]	Reduzierung [%]
ohne Dränage	-	1125	0
Entlastungsöffnung	10	1110	1
Horizontaldränage	10	901	20
	5	728	35
	2	475	58
Rigole	-	743	34
Flächendränage	-	410	64

Tabelle 2: Reduzierung des Wasserdrucks auf das Widerlager durch die Dränagesysteme

Table 2: Reduction of water pressure on the abutment due to drainage systems

Der Einsatz von Entlastungsöffnungen im Abstand von 10 m führt nur zu einer geringen Reduzierung des maßgebenden Wasserdrucks um ca. 1 %. Auch bei einer Verringerung des Abstands zwischen den Entlastungsöffnungen ist keine relevante Wasserdruckreduzierung zu erwarten.

Größer ist die Reduzierung des maßgeblichen Wasserdrucks beim Einsatz von Horizontaldränagen. Der sehr große Abstand von 10 m führt bereits zu einer Reduzierung von 20 %. Durch die Verringerung des Abstandes der Horizontaldränagen kann eine größere Reduzierung erreicht werden. Je dichter der Abstand gewählt wird, desto mehr nähert sich die Wirkung der Horizontaldränagen derjenigen einer Flächendränage an. Mit Horizontaldränagen mit einem Abstand von 2 m wird bereits eine Reduzierung des maßgebenden Wasserdrucks um 58 % erzielt.

Durch den Einsatz der über die gesamte Breite reichenden Rigole wird lediglich eine Reduzierung des maßgeblichen Wasserdrucks um 34 % erzielt. Die relativ geringe Entlastungswirkung ist durch die geringe Tiefe der nicht bis hinter die aktive Gleitfuge reichenden Rigole begründet.

Die größte Reduzierung des maßgebenden Wasserdrucks um 64 % wird durch die Flächendränage erzielt. Dies ist begründet durch ihre Wirkung über die gesamte Breite des Widerlagers und in der Tiefe bis über die aktive Gleitfläche hinaus.

5 Zusammenfassung Conclusion

Die beste Entlastungswirkung wird durch die über die gesamte Bauwerksbreite und bis über die aktive Gleitfläche hinausreichende Flächendränage erzielt. Die zwar ebenfalls über die gesamte Breite des Bauwerks reichende, jedoch nur eine geringe Tiefe aufweisende Rigole hat eine deutlich geringere Entlastungswirkung. Dies ist durch die bei der Anströmung der Rigole (und damit des Widerlagers) im Gleitkeil wirkenden Strömungskräfte begründet.

Entlastungsöffnungen in einem Bauwerk bewirken nur eine sehr geringe, räumlich stark begrenzte Reduzierung des Wasserdrucks. Die nachträgliche Herstellung von Entlastungsöffnungen führt demnach nicht zu einer relevanten Erhöhung der Bauwerksstandsicherheit.

heit. Im Gegensatz zu Entlastungsöffnungen können Horizontaldränagen, die bis über den aktiven Gleitkeil hinaus reichen, eine deutliche Reduzierung des Wasserdruckes auf das Bauwerk bewirken. Allerdings ist, in Abhängigkeit von der benötigten Wasserdruckreduzierung, ein relativ geringer Abstand der Horizontaldränagen erforderlich.

Um eine möglichst hohe hydraulische Wirkung zu erzielen und um eine ausreichende Bodenüberdeckung bis zum Kanal zu gewährleisten, sollten Dränagen möglichst tief angeordnet werden. Es muss jedoch ein freier Abfluss oberhalb des angrenzenden Geländes gegeben sein. Außerdem sollten Dränagen, die nur zur Sicherung der Bauwerksstandsicherheit bei hydraulischem Versagens der Kanaldichtung dienen, bei funktionsfähiger Kanaldichtung nicht durch Grundwasser eingestaut werden.

Die Filterstabilität zwischen Boden und Baugrund ist sorgfältig sicherzustellen. Dies betrifft insbesondere auch die Anschlussbereiche zum Bauwerk. Beim nachträglichen Einbau von Dränagen dürfen durch die Horizontalbohrungen kein über den Bohrquerschnitt hinausreichender Bodenentzug sowie keine Bodenauflockerungen erfolgen. Um eine ausreichende hydraulische Wirksamkeit der Horizontalbrunnen zu erzielen müssen die Brunnenrohre mit einem gegenüber dem anstehenden Boden stabilen Filter ausreichender und gleichmäßiger Dicke ummantelt sein. In jedem Fall fordert die Erstellung von Dränagen, deren Betriebsfähigkeit während der gesamten Nutzungsdauer des Bauwerks gewährleistet werden muss, eine sorgfältige Planung unter Berücksichtigung der jeweiligen örtlichen Randbedingungen. Die Dimensionierung von Horizontaldränagen zur nachträglichen Erhöhung der Bauwerksstandsicherheit erfordert darüber hinaus eine, i. A. relativ aufwendige 3D-Grundwasserströmungsmodellierung. Dabei ist eine entsprechende, dreidimensionale Verfeinerung der Modelldiskretisierung im Bereich der Dränagen durchzuführen um den Potenzialabbau bei der Anströmung der Dränagen adäquat abzubilden.

6 Literatur *References*

- [1] Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Ausgabe 2011; Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- [2] DIN 4085:2007: Baugrund - Berechnung des Erd-drucks; Beuth Verlag, Berlin.

